

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО
Директор физтех-школы
аэрокосмических технологий
С.С. Негодяев

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Межфазная термодинамика
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Фундаментальная и прикладная физика природных систем Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра термодинамики океана
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.Б. Лапшин, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры термодинамики океана 22.03.2022

Аннотация

В лекционном курсе даются знания об основных уравнениях межфазной термогидродинамики для объемной и поверхностной фаз. Рассмотрены фазовые переходы и фазовые равновесия на границе раздела жидкость-пар в присутствии электрического поля, потери гидродинамической устойчивости и развития конвекции в межфазных зонах системы океан-атмосфера. Дается анализ роли различных типов межфазной конвекции в формирование потоков тепла, влаги, газовых компонент, включая углекислый газ в системе океан атмосфера. Излагаются основы нанотермогидродинамики применительно к межфазным процессам. Приводятся примеры геофизических приложений. Теоретическое рассмотрение иллюстрировано результатами расчетов, выполненных на современных компьютерных программах с использованием технологии параллельных кластерных вычислений.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- изучение основ межфазной термогидродинамики и приобретение практических навыков к их применению к различным задачам физики и геофизики.

Задачи дисциплины

- усвоить основные уравнения термогидродинамики, необходимые для успешного завершения учебной программы и будущей научно-исследовательской работы.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основы физических процессов и явлений, происходящих в природных и техногенных межфазных зонах.

уметь:

- применять полученные знания на практике;
- работать с литературными источниками по предмету;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач;
- производить численные оценки по порядку величины.

владеть:

- рассмотренными в курсе основами межфазной термогидродинамики;
- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Предмет и задачи курса, основные понятия	6	6		10
2	Молекулярные и электрические силы в межфазных слоях	2	2		5
3	Термодинамика поверхностных и объемных фаз	2	2		5
4	Термодинамический подход в системе океан-атмосфера	6	6		7
5	Межфазная капиллярно-гравитационная конвекция	8	8		9
6	Уравнение Обербека-Буссинеска для двумерной жидкости	6	6		9
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Предмет и задачи курса, основные понятия

Предмет и задачи курса «Межфазная термогидродинамика». Современное состояние, перспективы развития и практическое приложение в различных областях знания.

Геометрическое, гидродинамическое, термодинамическое, включая методы статистической физики, определения границы раздела фаз (межфазной поверхности). Введение в теорию двумерной жидкости Буссинеска.

Механические, термодинамические, химические, электрические и биологические явления как причина гидродинамической неустойчивости межфазной поверхности.

2. Молекулярные и электрические силы в межфазных слоях

Молекулярные и электрические силы в межфазных слоях. Силы действующие в газообразной и жидкой фазах, а также на границе раздела жидкость-пар в присутствии электрического поля.

3. Термодинамика поверхностных и объемных фаз

Основные термогидродинамические параметры поверхностной и объемной фаз (межфазная вязкость, поверхностное давление и другие).

4. Термодинамический подход в системе океан-атмосфера

Термодинамические соотношения для газообразной и жидкой фаз в системе океан-атмосфера в присутствии электрического поля.

Термодинамика фазовых переходов воды в атмосфере. Фазовое равновесие на границе раздела жидкость-пар в присутствии электрического поля.

Применимость термодинамического подхода к описанию физических процессов в межфазной зоне системы океан-атмосфера.

5. Межфазная капиллярно-гравитационная конвекция

Общие вопросы потери гидродинамической устойчивости и развитие конвекции в межфазных зонах системы океан-атмосфера.

Основные уравнения межфазной термогидродинамики для объемной и поверхностной фаз. Начально-краевая задача термогидродинамики в приближении Обербека-Буссинеска.

Реологические соотношения для поверхностной и объемной фаз. Тензор напряжений и тензор скоростей деформаций для поверхностной фазы.

Линейное приближение для уравнений межфазной термогидродинамики.

Критерии развития гравитационно-капиллярной конвекции в межфазной зоне системы океан-атмосфера в том числе при наличии течения Куэтта. Спектральный и энергетический методы анализа.

6. Уравнение Обербека-Буссинеска для двумерной жидкости

Начальная краевая задача для уравнения Обербека-Буссинеска. Граничные условия для температуры, концентрации и скорости течения жидкости. Физический механизм потери устойчивости.

Численные методы решения начальной краевой задачи гравитационно-капиллярной конвекции для уравнения Обербека-Буссинеска.

Режимы развития гравитационно-капиллярной конвекции в системе океан-атмосфера. Роль гравитационно-капиллярной конвекции в формировании потоков тепла, соли, влаги и газовых компонент, включая углекислый газ, в системе океан-атмосфера. Геофизические приложения полученных результатов.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

аудитория, компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, интерактивная доска).

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Гидродинамика межфазных поверхностей [Текст], сборник статей/пер. с англ. , -М., Мир, 1984
2. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 8 : Электродинамика сплошных сред : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— М. : Наука, 1992, 2001, 2003, 2005 .— 662 с.
1. Б.В. Дерягин, Н.В.Чураев, В.М.Муллер Поверхностные силы. Москва, издательство «Мир», 1987.

Дополнительная литература

1. M. Chaplin Water structure and science, UK London south bank university ,2011
2. В.Б. Лапшин, М.Ю. Яблоков, А.А. Палей Давление пара над заряженной каплей, Журнал физической химии, 2007, т.76, №10
3. О.В. Карпов и др. Наночастицы в атмосферном воздухе. Методы измерения, Измерительная техника, 2011, №3, с.31-34
4. M.A. Hampton, Nanobubbles and bridging force, Adv.Coll. Interface Sci.,333,2009 ,800-8006.
5. S.N. Novikov etc. Influence structure of water on the kinetic vaporization, J.Phys/Chem, 2010, 534-537

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Пакеты офисного программного обеспечения Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), программные комплексы (учебные версии) Flow Vision, Solid Works.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Успешное освоение курса требует большой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе);
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к контрольным, самостоятельным работам.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов контрольных и самостоятельных работ, а также индивидуальных консультаций.

Показателем владения материалом служит знание основ физических процессов и явлений, происходящих в природных и техногенных межфазных зонах.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Фундаментальная и прикладная физика природных систем Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра термогидромеханики океана
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	В.Б. Лапшин, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Межфазная термогидродинамика» обучающийся должен:

знать:

- основы физических процессов и явлений, происходящих в природных и техногенных межфазных зонах.

уметь:

- применять полученные знания на практике;
- работать с литературными источниками по предмету;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач;
- производить численные оценки по порядку величины.

владеть:

- рассмотренными в курсе основами межфазной термогидродинамики;
- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Перечень вопросов для теста:

1. Сформулировать основные понятия межфазной термогидродинамики.
2. Дать определение фазовых переходов и фазовых равновесий на границе раздела жидкость-пар
3. Формула Гиббса и ее физический смысл.
4. Понятие границы раздела фаз.
5. Понятие объемной и поверхностной фаз.

6. Основные термогидродинамические параметры поверхностной и объемной фаз.
7. Молекулярные и электрические силы в межфазных слоях.
8. Гидродинамическая неустойчивость межфазной поверхности и типы явлений ее вызывающие.
9. Физические параметры границы раздела океан-атмосфера.
10. Термодинамические особенности фазовых переходов на границе раздела океан-атмосфера.
11. Особенности фазового равновесия на границе раздела жидкость-пар в присутствии электрического поля.
12. Типы межфазной конвекции.
13. Определение капиллярной конвекции в межфазной зоне системы океан-атмосфера
14. Написать уравнения межфазной термогидродинамики для объемной и поверхностной фаз.
15. Понятие двумерной жидкости.
16. Уравнения для объемной и двумерной жидкостей.
17. Дать определение тензора напряжений и тензора скоростей деформаций для поверхностной фазы.
18. Понятие нанотермогидродинамики применительно к межфазным процессам.
19. Ограничения в применимости термодинамического подхода для описания объемных и поверхностных фаз.

Темы лекционных обсуждений:

1. Современное состояние и перспективы развития межфазной термогидродинамики.
2. Геофизические приложения межфазной термогидродинамики

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень вопросов для экзамена:

1. Основные понятия межфазной термогидродинамики.
2. Уравнение Навье–Стокса, коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости.
3. Определение границы раздела фаз. Понятие межфазной поверхности.
4. Основные типы гидродинамической неустойчивости в межфазной зоне
5. Течение Тейлора–Куэтта.
6. Молекулярные и электрические силы в межфазных слоях
7. Течение Пуазейля (в канале и трубе).
8. Подобия Рейнольдса.
9. Основные термогидродинамические параметры поверхностной и объемной фаз.
10. Сопротивления для сферы, движущейся в жидкости: асимптотики малых и больших чисел Рейнольдса.
11. Уравнения Прандтля в теории пограничного слоя.
12. Фазовое равновесие на границе раздела жидкость-пар в присутствии электрического поля.
13. Микромасштаб Колмогорова и энергетический спектр в локально однородной и изотропной турбулентности.
14. Понятие межфазной зоны системы океан-атмосфера и термодинамический подход к описанию физических процессов в ней.
15. Конвекция в межфазных зонах системы океан-атмосфера.
16. Основные уравнения межфазной термогидродинамики для объемной и поверхностной фаз.
17. Числа Марангони и Релея, уравнения Обербека-Буссинеска.
18. Начальная краевая задача для уравнения Обербека-Буссинеска
19. Тензор деформации и тензор напряжений. Связь между ними.
20. Реологические соотношения для поверхностной и объемной фаз.
21. Критерии развития гравитационно-капиллярной конвекции в межфазной зоне.
22. Граничные условия для температуры, концентрации и скорости течения жидкости.
23. Гидродинамическое моделирование эффектов на свободной поверхности жидкости.
24. Примеры геофизических приложений межфазной термогидродинамики.

Примеры билетов:

№1

1. Основные понятия межфазной термогидродинамики.
2. Тензор деформации и тензор напряжений. Связь между ними.

№2

1. Уравнение Навье–Стокса, коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости.
2. Конвекция в межфазных зонах системы океан-атмосфера.

№3

1. Фазовое равновесие на границе раздела жидкость-пар в присутствии электрического поля.
2. Критерии развития гравитационно-капиллярной конвекции в межфазной зоне.

Критерии оценивания

Оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета, он показал, что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена при подготовке ответов на билеты, обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами и любой другой литературой.

Во время проведения экзамена при ответе обучающегося на вопросы по билету или по программе дисциплины, он не может пользоваться конспектами и любой другой литературой.